

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

**Fakulta mechatroniky, informatiky
a mezioborových studií**

Studijní program: B2612 - Elektronika a informatika

Studijní obor: 2612R011 - Elektronické informační a řídicí systémy

Měření elektrických a tepelných vlastností geopolymérů

Measuring of electrical and thermal properties of geopolymers

Bakalářská práce

Autor: **Tomáš Polášek**

Vedoucí práce: Ing. Jaroslav Nosek, Ph.D.

Konzultant: Doc. Dr. Ing. Miroslav Černík, CSc

V Liberci 20.5.2011

Prohlášení

Byl(a) jsem seznámen(a) s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé bakalářské práce a prohlašuji, že **souhlasím** s případným užitím mé bakalářské práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom(a) toho, že užít své bakalářské práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

Bakalářskou práci jsem vytvořil(a) samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Děkuji všem, kteří mi pomohli při realizaci této bakalářské práce. Za její téma M. Černíkovi, za významnou pomoc v laboratoři i mimo ni J. Noskovi. Také děkuji Štěpánce Kvapilové za výrobu a poskytnutí měřených vzorků. Nakonec díky všem ostatním za trpělivost a ochotu pomoc.

Abstrakt

Tématem bakalářské práce je měření a vyhodnocení elektrických a tepelných vlastností geopolymérů. Bakalářská práce je rozdělena do několika kapitol, které řeší dílčí problémy k danému tématu. Na začátku práce bylo třeba se nejdříve seznámit s některými důležitými informacemi (např. definicemi výrazů, určení vzorců pro výpočet, nebo seznámení s technikami měření). Souhrn těchto informací je následně popsán v rešerši. V následujících kapitolách je poté popsáno řešení samotného měření. V nich je uveden nejen postup měření a výpočet potřebných hodnot, ale jsou zde uvedeny také získané výsledky zapsané do tabulek. Pro lepší porovnatelnost a přehlednost vzorků mezi sebou, jsou výsledky z tabulek převedeny do grafů. Na základě výsledků měření byly vybrány vzorky s nejlepšími vlastnostmi, přičemž dosažené výsledky předkládané práce také určily další směr vývoje složení geopolymérů s co nejlepší tepelnou a elektrickou vodivostí.

Abstract

The theme of bachelor work is measurement and evaluation of electrical and thermal properties of geopolymers. The bachelor work is divided into several chapters that address specific problems of the topic. In the beginning it must first become acquainted with some important information (E.g. as definitions of terms, identification of formulas, or to get acquainted with the techniques of measurement). All that information is subsequently described in the search. The following chapter then describes the solution of actual measurements. In them, given not only the method of measuring and calculating the necessary values, but here are the results obtained also holding a table. For better comparability and transparency between the results of tables converted into graphs. On the basis result of measurement were to be choice samples with best properties, whereas achieved results construed work also determined next trend development structure geopolymers with the best possible thermal and electrical conductivity.

Obsah

Prohlášení.....	3
Poděkování.....	4
Abstrakt.....	5
Obsah	6
Seznam obrázků	7
Seznam grafů	8
Seznam tabulek.....	8
1 Úvod.....	9
2 Teoretická část	10
2.1 Geopolymery.....	10
2.1.1 Definice geopolimeru.....	10
2.1.2 Struktura geopolimeru	10
2.1.3 Výroba geopolimeru	10
2.1.4 Vlastnosti geopolimeru	10
2.2 Elektrická vodivost.....	11
2.3 Teplotní závislost	11
2.4 Tepelná vodivost	11
2.5 Závislost tepelné vodivosti materiálů na jejich hustotě	13
2.6 Měření tepelné vodivosti.....	13
2.6.1 Stacionární měření.....	13
2.6.2 Nestacionární měření	15
2.7 V-A charakteristika	16
2.7.1 Měření napětí	16
2.7.2 Měření proudu.....	16
3 Experimentální část.....	17
3.1 Geopolymerní vzorek.....	17
3.2 Elektrická vodivost.....	18
3.2.1 Návrh schématu a obvodu zapojení	18
3.2.2 Měření elektrické vodivosti	18
3.2.3 Vyhodnocení měření elektrické vodivosti	19

3.3	Tepelná vodivost	30
3.3.1	Návrh obvodu a realizace zapojení	30
3.3.2	Měření rychlosti zahřívání vzorku	30
3.3.3	Vyhodnocení měření tepelné vodivosti	31
4	Závěr	35
	Seznam použité literatury	37
	Příloha A: Přístroje pro měření	38
	Příloha B: Obvody měření	40
	Příloha C: Vzorky po měření	41

Seznam obrázků

Obrázek 1:	Přístroj podle Bocka, převzato z [6]	14
Obrázek 2:	Schéma Fitchova přístroje, převzato z [6]	15
Obrázek 3:	Základní zapojení elektrického obvodu pro měření V-A charakteristiky	16
Obrázek 4:	Měřený geopolymerní vzorek	17
Obrázek 5:	Schéma zapojení pro měření elektrické vodivosti	18
Obrázek 6:	Plotýnka s hliníkovým kvádrem a izolací	30
Obrázek 7:	Aparatura pro měření tepelné vodivosti	30
Obrázek A1:	Zdroj napětí (DF-1731SB3A)	38
Obrázek A.2:	Laboratorní pec (LMH07/12)	38
Obrázek A.3:	Multimetr s automatickým záznamem dat (Votcraft VC 960)	39
Obrázek A.4:	Upevňovač vzorků	39
Obrázek A.5:	Rohnson R-220 elektrický vařič jednoplotýnkový	39
Obrázek B.1:	Obvod měření elektrické vodivosti	40
Obrázek B.2:	Aparatura pro měření tepelné vodivosti	40
Obrázek C.1:	Slepý vzorek	41
Obrázek C.2:	Vzorek PMM 20	41
Obrázek C.3:	Vzorek PAM 16	41
Obrázek C.4:	Vzorek PAM 17	41
Obrázek C.5:	Vzorek PAM 22	41
Obrázek C.6:	Vzorek SV 18	41
Obrázek C.7:	Vzorek SV 19	41

Seznam grafů

Graf 1: V-A charakteristika vzorků SV při teplotě 20 °C.....	20
Graf 2: V-A charakteristika vzorků SV při teplotě 100 °C.....	21
Graf 3: V-A charakteristika vzorků SV při teplotě 200 °C.....	22
Graf 4: V-A charakteristika vzorků SV při teplotě 300 °C.....	23
Graf 5: V-A charakteristika vzorků SV při teplotě 400 °C.....	24
Graf 6: V-A charakteristika vzorků PAM při teplotě 20 °C	25
Graf 7: V-A charakteristika vzorků PAM a PMM při teplotě 100 °C	26
Graf 8: V-A charakteristika vzorků PAM a PMM při teplotě 200 °C	27
Graf 9: V-A charakteristika vzorků PAM a PMM při teplotě 300 °C	28
Graf 10: V-A charakteristika vzorků PAM a PMM při teplotě 400 °C	29
Graf 11: Závislost proudění tepla na čase u vzorků typu SV	32
Graf 12: Závislost proudění tepla na čase u vzorků typu PAM a PMM.....	33
Graf 13: Závislost proudění tepla na čase u vzorků typu SV 18, PAM 17 a PMM 20...	34

Seznam tabulek

Tabulka 1: Hodnoty tepelné vodivosti vybraných materiálů při teplotě 20 a 25 °C.	12
Tabulka 2: Složení geopolymerních vzorků pro měření.....	17
Tabulka 3: Celkové porovnání vzorků na elektrickou vodivost.....	19
Tabulka 4: Hodnoty vzorků SV při teplotě 20 °C	20
Tabulka 5: Hodnoty vzorků SV při teplotě 100 °C	21
Tabulka 6: Hodnoty vzorků SV při teplotě 200 °C	22
Tabulka 7: Hodnoty vzorků SV při teplotě 300 °C	23
Tabulka 8: Hodnoty vzorků SV při teplotě 400 °C	24
Tabulka 9: Hodnoty vzorků PAM při teplotě 20 °C	25
Tabulka 10: Hodnoty vzorků PAM a PMM při teplotě 100 °C	26
Tabulka 11: Hodnoty vzorků PAM a PMM při teplotě 200 °C	27
Tabulka 12: Hodnoty vzorků PAM a PMM při teplotě 300 °C	28
Tabulka 13: Hodnoty vzorků PAM a PMM při teplotě 400 °C	29
Tabulka 14: Porovnání hodnot vzorků typu SV se slepým vzorkem při určení tepelné vodivosti.....	32
Tabulka 15: Porovnání hodnot vzorků typu PAM a PMM se slepým vzorkem při určení tepelné vodivosti.....	33
Tabulka 16: Porovnání hodnot vybraných vzorků typu SV, PAM a PMM se slepým vzorkem při určení tepelné vodivosti.....	34

1 Úvod

Předpokládaná práce má za cíl měření elektrických a tepelných vlastností geopolymerů. Aby mohlo být provedeno samotné měření, bylo nejprve nutné najít a prostudovat dostupné materiály popisující strukturu a vlastnosti geopolymerů. Z takto získaných informací je následně vypracována jednoduchá rešerše. Po nastudování těchto vlastností a vyhodnocení jejich vzájemných vztahů se práce přesunula od teoretické části k laboratorní. Tato část se zabývala měřením různých typů vzorků. Pro správné získávání hodnot bylo zapotřebí nastudovat veškeré typy měření pro různé vlastnosti. Z těchto typů byly vybrány takové, které mohly být provedeny v laboratoři školy.

Měření proběhlo po konzultaci s vedoucím pomocí tzv. stacionárního měření. Po jeho nastudování bylo potřeba navrhnout vhodné schéma zapojení. Podle tohoto schématu se poté vybraly a koupily pomůcky (přístroje) pro měření. Obvod nebyl těžký na zrealizování a také přístrojů bylo minimum. Hlavní část obvodu tvořily multimetry, které zaznamenávaly průběžně hodnoty z měření. Měření bylo prováděno pro různé typy vzorků, které se lišily vnitřním složením. Byly měřeny jejich V-A charakteristiky pro různé teploty a rychlost zahřívání vzorku. Získané hodnoty se zapisovaly do tabulek. Hodnoty z tabulek se porovnávaly mezi sebou. Z nich byly vybrány vzorky, které měly nejvyšší elektrickou vodivost a vykazovaly nejrychlejší přenos tepla.

2 Teoretická část

2.1 Geopolymery

2.1.1 Definice geopolimeru

Pod názvem geopolymery [1] se skrývají anorganické, uměle vyrobené (polymerní) materiály připravované reakcí základních hlinito-křemičitanových minerálů v zásaditém prostředí za normální teploty a tlaku. Tato reakce se označuje jako geopolimerace.

Geopolymery nabízejí různorodé uplatnění. Pro svou extrémní odolnost mohou sloužit především jako vynikající izolace a stavební materiál.

2.1.2 Struktura geopolimeru

Geopolymery jsou sloučeniny hliníku a křemíku [2] (Si-O-Al-O), jsou pojícím stavebním prvkem chemických řetězců. Ke geochemickým syntézám dochází pomocí oligomerů (dimerů, trimerů), které tvoří strukturu jednotky třírozměrné makromolekulární stavby.

2.1.3 Výroba geopolimeru

Geopolymery se obecně vyrábějí alkalickou aktivací vhodného materiálu, např. odpadních materiálů (elektrárenského popílku) a různé strusky, nebo z materiálů již využívaných v betonářském průmyslu (např. metakaolin a Portlandský cement). Nejčastěji se využívají a zkoumají jejich různě připravené směsi spolu s plnivou (kamenivem a výztuží) ve snaze nalézt kombinaci s co nejlepšími vlastnostmi.

Na světě zatím existují dvě nalezená ložiska (Austrálie a Zbůch u Plzně) pro výrobu geopolimerů, která se už nemusí aktivovat (tzn. tepelně zpracovat při teplotě od 600–700 °C). Znamená to, že při výrobě geopolimerů už nevznikají žádné emise. V České republice se v ložiskách nachází lupek, který vznikl jako odpad z těžby černého uhlí.

2.1.4 Vlastnosti geopolimeru

Geopolymery nabízejí široké a různorodé uplatnění. Pro svou extrémní odolnost mohou sloužit jako vynikající izolace a stavební materiál. Jsou odolné k teplotám až do 1000 °C a jejich pevnost v tlaku dosahuje 60–100 MPa. Při správném množství použitého materiálu mohou mít také velkou tepelnou vodivost. Mechanické vlastnosti geopolimerů, hlavně pevnosti v tlaku rostou s časem a vykazují minimální smrštění. Mezi největší výhody geopolimerů patří jeho princip výroby, při kterém do ovzduší nevypouští žádné škodlivé emise. Přesto mikromechanické a další mechanické vlastnosti jsou stále ve stadiu výzkumu.

2.2 Elektrická vodivost

Elektrická vodivost [3] je fyzikální veličina, která popisuje schopnost vést elektrický proud. Udává velikost elektrického proudu procházející vodičem při jednotkovém napětí na jeho koncích.

Čím větší je vodivost, tím větší elektrický proud prochází vodičem při stejném napětí. Dobrý vodič má vysokou hodnotu vodivosti, špatný vodič má nízkou hodnotu vodivosti.

Vzorec pro výpočet:

$$G = \frac{I}{U} = \frac{I}{I \cdot R} = \frac{1}{R} \left(\frac{1}{\Omega} \right) \quad (1)$$

Elektrická vodivost je podíl elektrického proudu I (A), protékajícího vodičem a elektrického napětí U (V) na koncích vodiče. Elektrická vodivost je také převrácená hodnota elektrického odporu R (Ω).

Pomocí vlastnosti vodiče:

$$G = \sigma \times \frac{S}{l} \text{ (S)} \quad (2)$$

σ (S/m) je konduktivita látky, S (m^2) je obsah průřezu vodiče a l (m) je délka vodiče.

2.3 Teplotní závislost

Závislost elektrického odporu vodiče na teplotě. Za speciálních podmínek může elektrický odpor některých látek klesnout téměř na nulu. Takovým látkám se říká supravodiče.

$$R = R_0 * (1 + \alpha \Delta T) \text{ (}\Omega\text{)} \quad (3)$$

R_0 (Ω) je odpor vodiče při normální teplotě, α (1/K) je teplotní součinitel elektrického odporu a ΔT je teplotní rozdíl.

2.4 Tepelná vodivost

Tepelná vodivost [4] je schopnost materiálu vést teplo. Představuje rychlost, s jakou se teplo šíří z jedné zahřáté části látky do jiné, chladnější části. Tepelná vodivost dané látky je charakterizována **součinitelem tepelné vodivosti** (λ).

Součinitel tepelné vodivosti

Součinitel tepelné vodivosti λ ($W/m \cdot K$) je roven množství tepla Q (J), které projde za čas τ (s) plochou S (m^2) a podílem rozdílu teplot na různých stranách tělesa ve vzdálenosti d (m).

Vzorec pro výpočet:

$$\lambda = Q * \tau * S * \frac{\Delta T}{d} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right) \quad (4)$$

Vlastnosti:

Tepelná vodivost je částečně závislá na teplotě. U kovů s rostoucí teplotou klesá, zatímco u polovodičů naopak s teplotou roste.

Tepelná vodivost kapalin a plynů je udávána v klidu (nedochází k přenosu tepla prouděním).

Tabulka 1: Hodnoty tepelné vodivosti vybraných materiálů při teplotě 20 a 25 °C.

Látka	λ ($W/m \cdot K$) 20 °C	λ ($W/m \cdot K$) 25 °C
Diamant	895 - 2300	-
Stříbro	429	418
Měď	386	395
Zlato	317	310
Hliník	237	229
Tuha (grafit)	119 - 165	-
Mosaz	120	-
Železo	80,2	73
Platina	71,6	-
Olovo	35,3	-
Rtuť	8,514	-
Led (0 °C)	2,2	-
Uhlík	-	1,7
Sklo	1,35	0,60 - 1,0
Voda	0,6062	1
Olej	0,13	-
Dřevo	0,04 - 0,35	-
Polystyrenová pěna	0,033	0,035
Vzduch (normální tlak)	0,0262	0,024
Aerogel	0,015 - 0,020	-

2.5 Závislost tepelné vodivosti materiálů na jejich hustotě

Pro porovnávání tepelné vodivosti materiálů můžeme někdy použít i hustotu materiálu.

Vzorec pro výpočet:

$$\rho = \frac{m}{V} \left(\frac{kg}{m^3} \right) \quad (5)$$

ρ (kg/m^3) je hustota materiálu, m (kg) je hmotnost materiálu, V (m^3) je objem materiálu

Pro porovnávání platí následující pravidla:

- Materiály s nízkou hustotou mají tepelnou vodivost kolem 0,04 W/m*K.
- Materiály s vyšší hustotou mají tepelnou vodivost kolem 0,08 W/m*K.

Z těchto pravidel tedy vyplývá, že čím je hustota materiálu vyšší, tím je také větší jeho tepelná vodivost.

2.6 Měření tepelné vodivosti

Měřit přesně množství tepla [5], které projde materiálem, je poměrně náročné. Zvláště proto, že k tomu neexistuje žádný jednoduchý přístroj. Z tohoto důvodu se používá nepřímých metod, kdy jsou měřeny ostatní veličiny při udržování konstantního průchodu tepla materiálem.

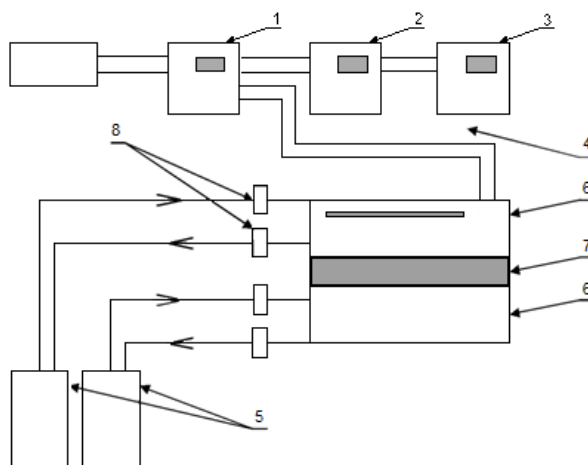
Existuje celá řada možných způsobů, jak měřit tepelnou vodivost, každá z nich je vhodná pro jiný rozsah materiálů, v závislosti na tepelné vlastnosti. Pro většinu měření lze použít dva typy měření [6]: stacionární (ustálené) a nestacionární (přechodové).

2.6.1 Stacionární měření

Při tomto stavu se měření provádí tehdy, nemění-li se teplota materiálu s časem. To se provádí pomocí analýzy signálu (ustálený stav vyžaduje pravidelné signály).

Vzorek neznámé vodivosti je umístěn mezi dva vzorky o známé vodivosti (obvykle mosazné desky). Na horní část vzorku se vloží teplejší mosazná deska a pod vzorek se vloží studená mosazná deska. Teplo je dodáváno do horní desky a pohybuje se dolů. Měření se provádí, dokud není stejné teplo v celém vzorku (cca. 10 minut). Na závěr se získaná hodnota porovná se dvěma nejbližšími hodnotami v tabulkou známých hodnot.

A) Přístroj podle Bocka



Obrázek 1: Přístroj podle Bocka, převzato z [6]

- | | |
|---------------------------------|------------------------|
| 1 - motorový kompenzátor | 5 - termostaty |
| 2 - wattmetr | 6 - topné desky |
| 3 - 12 stupňový přepínač topení | 7 - zkušební deska |
| 4 - topení | 8 - odporové teploměry |

V tomto měření (obr. 1) se vkládá vzorek mezi dvě temperované desky přístroje. Horní deska má teplotu přibližně o 5–10 °C vyšší než deska dolní. Přesnost rozdílu mezi dvěma deskami musí být minimálně $\pm 0,1$ °C. Pro udržování konstantních teplot se používá kapalina čerpaná z termostatu, nebo přímo regulací odporového topení v kovovém bloku. Takto můžeme měřit kolmý průtok tepla tělesem o známé tloušťce.

Měřený vzorek musí mít určitý tvar (o něco větší než je průměr desky) a zároveň musí být rovný a hladký. Mezi měřeným vzorkem a deskou nesmí být žádná vzduchová vrstva. Pokud se ale vzduchová vrstva objeví, používá se k jejímu vyplnění kapalina (např. olej, glycerin, ...).

Po spuštění přístroje a dosažení ustáleného stavu (cca. za jednu hodinu) se po 15 minutových intervalech odečítají údaje na wattmetru a na teploměrech na horní a dolní desce přístroje. Teploty se měří pomocí odporových teploměrů (přesnost $\pm 0,05$ °C). Oba teploměry jsou zapojeny v sérii a měří se celkový odpor (udává průměrnou teplotu desky). Pomocí tohoto způsobu je měření nejen citlivější, ale umožňuje měření i velmi tenkých vrstev.

B) Deskový přístroj podle Poensgena

Tento přístroj je určen především pro měření tepelné vodivosti vzorků ve tvaru desek. Tato metoda je jedna z nejrozšířenějších.

Mezi ohřívanou a ochlazenou deskou přístroje je vytvořeno tepelné pole se souběžnými proudnicemi, které přechází kolmo zkoušeným vzorkem. Základem měření je šíření tepelného toku a rozdíl povrchových teplot vzorků za ustáleného tepelného stavu. Z takto získaných hodnot se poté vypočítá tepelná vodivost.

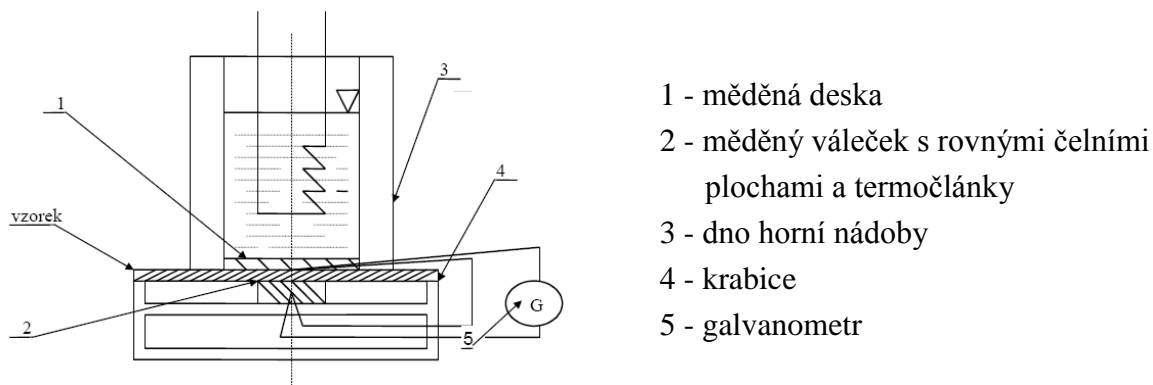
2.6.2 Nestacionární měření

Při tomto stavu lze provést měření v průběhu procesu zahřívání. Provádí se pomocí jehlových sond.

Tento proces nevyžaduje signál k získání konstantní hodnoty. Místo toho je signál brán jako funkce času. Hlavní výhodou této metody je, že její provedení je rychlé, protože není třeba čekat na ustálení stavu. Nevýhodou je, že matematický výpočet (4) hodnot je obecně těžší.

Přístroj podle Fitcha

K měření tepelné vodivosti nestacionární metodou se používá přístroj podle Fitcha (obr. 2). Tohoto přístroje se používá především k měření tepelné vodivosti izolačních materiálů, pryží, usňových materiálů.

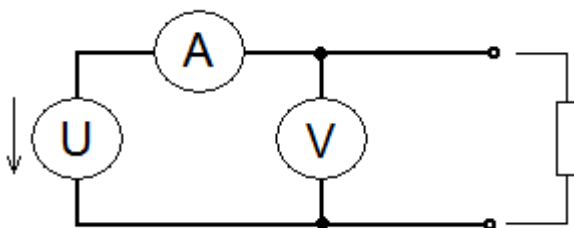


Obrázek 2: Schéma Fitchova přístroje, převzato z [6]

Přístroj je složen ze dvou částí. Z měděné desky tvořící dno nádoby a měděných válečků tvořící termočlánky (Cu-Ko). Při měření se vzorek malé tloušťky vkládá mezi měděnou desku stálé teploty a měděný váleček, jehož teplota se mění s časem. Odhadovaná přesnost tohoto měření je cca. 5%.

2.7 V-A charakteristika

Je grafické znázornění závislosti proudu na napětí.



Obrázek 3: Základní zapojení elektrického obvodu pro měření V-A charakteristiky

2.7.1 Měření napětí

Elektrické napětí $U(V)$ je definováno jako rozdíl elektrických potenciálů mezi dvěma body vodiče. Podle průběhu v čase rozlišujeme napětí na **stejnoseměrné** (rozdíl potenciálů nemění svou orientaci), nebo **střídavé** (polarita je periodickou funkcí času).

Pro měření napětí používáme **voltmetr** ($1V = 1J/1C$), který k měřenému obvodu připojujeme **paralelně**. Metody měření napětí se liší podle požadované přesnosti.

Při měření střídavého napětí musíme rozlišovat mezi okamžitou, maximální, efektivní a střední hodnotou napětí.

2.7.2 Měření proudu

Elektrický proud $I(A)$ je roven celkovému množství elektrického náboje, které projde průřezem vodiče za jednotku času.

Měřidla elektrického proudu (ampérmetr) se zapojují **sériově** do té části obvodu, ve které má být proud změřen.

3 Experimentální část

3.1 Geopolymerní vzorek

Pro měření elektrických a tepelných vlastností geopolymérů byly použity vzorky poskytnuté **Ústavem pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace**, který se specializuje na jejich výrobu. Jejich cílem bylo vytvoření takových sloučenin materiálu, které by splňovaly určitá kritéria na dané vlastnosti (např. vysoká tepelná i elektrická vodivost, ...).

Vzorky pro naše měření byly vyráběny ve tvaru malého kvádrů o velikosti 35x40x60 mm (obr. 4). Na každý vzorek byly umístěny nerezové plíšky (elektrody), které sloužily k uchycení měřicích kabelů. Tyto elektrody však u některých vzorků během měření odpadly, a tak byly vzorky vkládány do tzv. upevňovače (Příloha A). Každý vzorek obsahoval různý poměr směsi (tabulka 2) grafitu, cementu, aktivátoru, ..., a tak každý z měřených vzorků vykazoval jiné hodnoty.

Tabulka 2: Složení geopolymerních vzorků pro měření

Vzorek	Cement [g]	Aktivátor [g]	Grafit [g]	Destilka [g]	Grafit [%]	Světlost ok
SV 18	50	350	250	0	33	0,160 mm
SV 19	50	350	200	50	31	0,160 mm
SV 21	50	300	300	0	46	0,160 mm
PAM 16	50	350	200	100	29	0,025 mm
PAM 17	50	350	250	250	28	0,025 mm
PAM 22	50	350	250	150+1*	31	0,025 mm
PMM 20	50	350	200	100	29	50 μ m
1* plastifikátor						



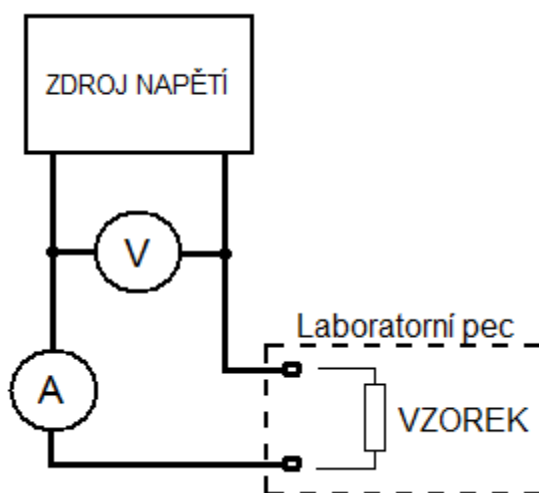
Obrázek 4: Měřený geopolymerní vzorek

3.2 Elektrická vodivost

3.2.1 Návrh schématu a obvodu zapojení

První laboratorní měření se zabývalo elektrickou vodivostí. Aby bylo možné měřit tuto vodivost, bylo nejdříve nutné si nakreslit schéma pro měření (obr. 5). Pro elektrickou vodivost je výsledkem množství proudu, které projde měřeným vzorkem v závislosti na nastaveném napětí. Pro měření a zároveň i zobrazení těchto hodnot jsou ve schématu použity 2 měřicí přístroje (voltmetr a ampérmetr). Ty jsou zapojeny podle elektrických pravidel.

Po nakreslení schématu se začalo s reálným zapojením. Celý obvod byl připojen na zdroj stejnosměrného napětí (příloha A). K tomuto zdroji byly připojovány vzorky pro měření. Nastavovací hodnota napětí se kontrolovala pomocí multimetru (příloha A) přepnutého na voltmetr. Ten byl do obvodu zapojen paralelně na zdroj napětí. Proud procházející obvodem se zobrazoval na druhém multimetru, tentokrát přepnutém na ampérmetr. Pro správné měření proudu byl připojen před vzorek do série. Pro měření byla použita vyhřátá pec (příloha A). V ní se měřila vodivost vzorku při různých teplotách. Do pece byl vkládán pouze vzorek.



Obrázek 5: Schéma zapojení pro měření elektrické vodivosti

3.2.2 Měření elektrické vodivosti

Po sestavení obvodu se začalo s měřením. Bohužel byla při prvních měření spálena pojistka na zdroji s max. proudovou ochranou do 10 A, a tak musel být zdroj vyměněn za jiný. Byl proto použit podobný zdroj. Ten měl ale menší proudovou ochranu, jenom do 3 A. Po této výměně se tedy začalo s opětovným měřením vzorků.

Měření probíhalo pro 5 různých teplot (20, 100, 200, 300 a 400 °C). Měření vzorku při 20 °C se provádělo na pracovním stole. U ostatních teplot se měřený vzorek vkládal do vyhřáté pece a vždy se čekalo cca. 20 minut na stabilizaci teploty. Vzorek byl napájen stejnosměrným zdrojem napětí, a proto se nastavovaly měřicí hodnoty od 1–30 V. Většinou bylo měření zastaveno proudovou ochranou zdroje při dosažení proudu 3 A.

Veškeré získané hodnoty z měření se automaticky zaznamenávaly do obou multimetrů. Z nich se pomocí propojovacího kabelu a programu VC_960 přesunuly do počítače. Zde byly zpracovány to tabulek. V každé tabulce jsou uvedeny hodnoty získané při měření a následně ke každé z nich je vypočítán odpor. Pro obecnější porovnávání je uveden i průměrný odpor a elektrická vodivost. Pro přehlednější porovnatelnost vzorků mezi sebou jsou z tabulek vytvořeny grafy.

3.2.3 Vyhodnocení měření elektrické vodivosti

Na následujících stránkách jsou zobrazeny tabulky a grafy jednotlivých měřených vzorků. Hodnoty v tabulkách jsou zaokrouhleny tak, aby bylo možné co nejlepší porovnání vzorků mezi sebou a zjištění, který z nich má nejlepší dané vlastnosti.

Každý ze vzorků byl měřen při teplotě (20, 100, 200, 300 a 400 °C). Vzorky byly rozděleny na dvě skupiny. Jedna skupina obsahovala vzorky s nulovou, nebo malou hodnotou (cca. 50 ml) destilované vody (SV 18, SV 19, SV 21). Druhá skupina obsahovala větší poměr (cca. 200–250 ml) destilované vody (PAM 16, PAM 17, PAM 22). K této skupině byl ještě přidán vzorek s podobnou strukturou (PMM 20).

Množství destilované vody obsažené v jednotlivých vzorcích bylo zásadní při měření. Proto byl každý vzorek měřen v jiném rozmezí napětí. Z výsledných hodnot lze tedy určit, že nejlepší elektrickou vodivost mají vzorky typu **SV**., jelikož tyto vzorky neobsahovaly téměř žádnou destilovanou vodu, mohl jimi procházet elektrický proud beze ztrát. Proto je jejich elektrická vodivost ve všech teplotních rozmezích téměř konstantní. Naopak vzorky typu PAM a PMM obsahují větší množství destilované vody. Proto se vzrůstající teplotou se odpařovala voda a docházelo tak k nárazovým změnám ve vedení proudu a jejich elektrická vodivost se s různou teplotou okolí měnila. Pro přehlednější porovnání elektrické vodivosti slouží tabulka 3.

Tabulka 3: Celkové porovnání vzorků na elektrickou vodivost

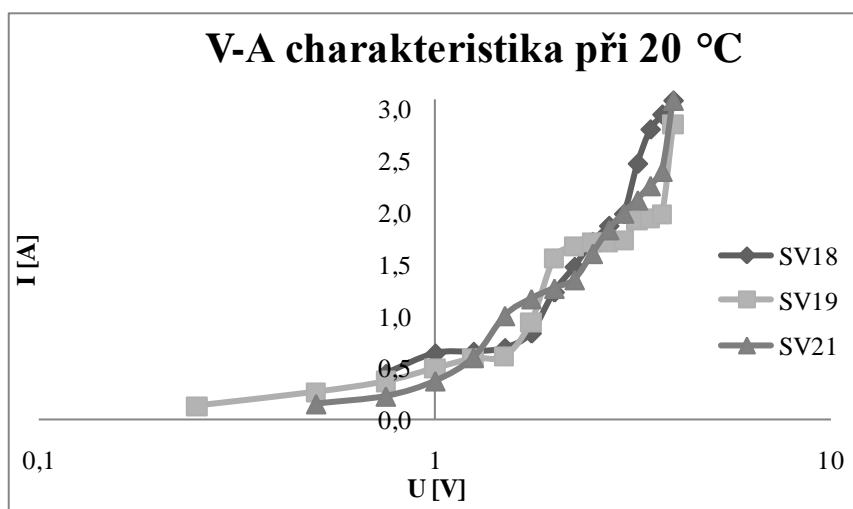
Vzorek	20 °C	100 °C	200 °C	300 °C	400 °C
SV 18	0,632	0,466	0,339	0,344	0,459
SV 19	0,565	0,426	0,440	0,363	0,269
SV 21	0,490	0,421	0,486	1,425	0,488
PAM16	0,444	0,171	0,678	0,524	0,606
PAM17	0,025	0,073	2,945	0,025	0,507
PAM22	0,009	0,013	0,038	0,736	0,401
PMM 20		0,228	0,328	0,005	0,119

Elektrická vodivost vzorku PMM 20 při teplotě 20°C není uvedena, protože hodnoty získané při tomto měření byly v tak malém rozsahu, že nemohly být použity.

Hodnoty vzorků SV 18, SV 19 a SV 21 pro elektrickou vodivost

Tabulka 4: Hodnoty vzorků SV při teplotě 20 °C

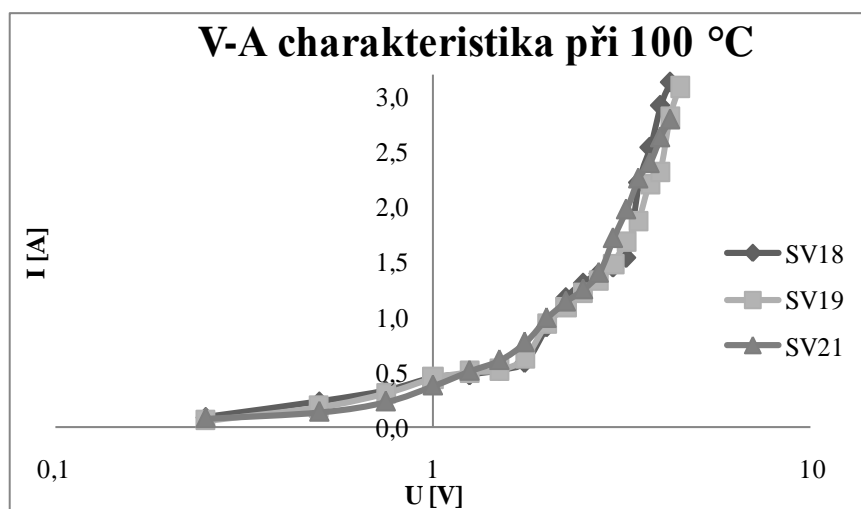
	20 °C					
	SV18		SV19		SV21	
U [V]	I [A]	R [Ω]	I [A]	R [Ω]	I [A]	R [Ω]
0,25			0,132	1,894		
0,30			0,164	1,829		
0,40			0,222	1,802		
0,50			0,266	1,880	0,158	3,165
0,60			0,322	1,863	0,169	3,550
0,75	0,438	1,712	0,368	2,038	0,232	3,233
0,80	0,496	1,613	0,401	1,995	0,286	2,797
0,90	0,589	1,528	0,457	1,969	0,339	2,655
1,00	0,636	1,572	0,496	2,016	0,380	2,632
1,25	0,652	1,917	0,590	2,119	0,608	2,056
1,50	0,688	2,180	0,612	2,451	1,012	1,482
1,75	0,832	2,103	0,944	1,854	1,175	1,489
2,00	1,230	1,626	1,564	1,279	1,276	1,567
2,25	1,476	1,524	1,683	1,337	1,360	1,654
2,50	1,718	1,455	1,718	1,455	1,614	1,549
2,75	1,874	1,467	1,720	1,599	1,844	1,491
3,00	1,990	1,508	1,740	1,724	2,005	1,496
3,25	2,478	1,312	1,924	1,689	2,132	1,524
3,50	2,810	1,246	1,948	1,797	2,271	1,541
3,75	2,954	1,269	1,994	1,881	2,410	1,556
4,00	3,090	1,294	2,856	1,401	3,098	1,291
4,25			3,030	1,403		
4,50			3,090	1,456		
Průměrný odpor:	1,583		1,771		2,041	
Průměrná vodivost:	0,632		0,565		0,490	



Graf 1: V-A charakteristika vzorků SV při teplotě 20 °C

Tabulka 5: Hodnoty vzorků SV při teplotě 100 °C

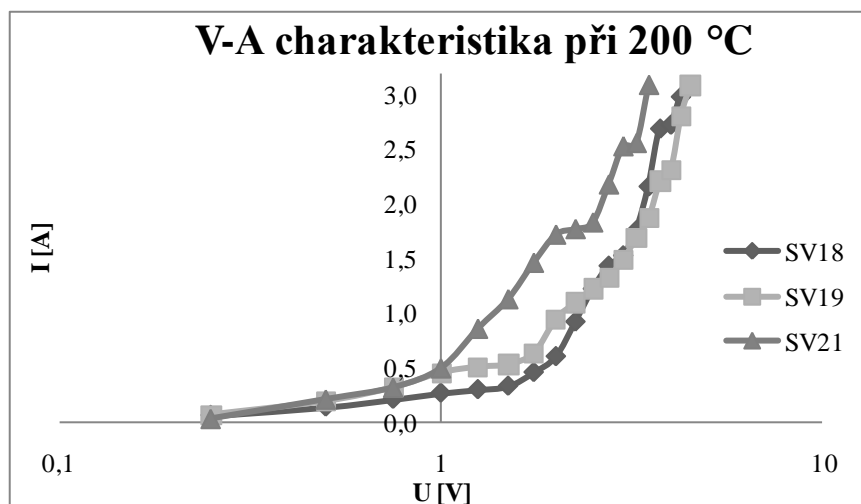
	100 °C					
	SV18		SV19		SV21	
U [V]	I [A]	R [Ω]	I [A]	R [Ω]	I [A]	R [Ω]
0,25	0,086	2,907	0,064	3,906	0,082	3,049
0,30	0,121	2,479	0,086	3,488	0,093	3,226
0,40	0,187	2,139	0,102	3,922	0,123	3,252
0,50	0,228	2,193	0,188	2,660	0,140	3,571
0,60	0,276	2,174	0,264	2,273	0,178	3,371
0,75	0,328	2,287	0,314	2,389	0,234	3,205
0,80	0,379	2,111	0,364	2,198	0,276	2,899
0,90	0,407	2,211	0,399	2,256	0,365	2,466
1,00	0,446	2,242	0,450	2,222	0,380	2,632
1,25	0,474	2,637	0,503	2,485	0,514	2,432
1,50	0,512	2,930	0,525	2,857	0,612	2,451
1,75	0,587	2,981	0,630	2,778	0,774	2,261
2,00	0,912	2,193	0,942	2,123	0,996	2,008
2,25	1,178	1,910	1,092	2,060	1,146	1,963
2,50	1,310	1,908	1,224	2,042	1,258	1,987
2,75	1,398	1,967	1,328	2,071	1,409	1,952
3,00	1,456	2,060	1,486	2,019	1,726	1,738
3,25	1,543	2,106	1,692	1,921	1,988	1,635
3,50	2,228	1,571	1,872	1,870	2,270	1,542
3,75	2,548	1,472	2,210	1,697	2,410	1,556
4,00	2,930	1,365	2,316	1,727	2,646	1,512
4,25	3,142	1,353	2,812	1,511	2,809	1,513
4,50			3,090	1,456		
Průměrný odpor:	2,145		2,345		2,374	
Průměrná vodivost:	0,466		0,426		0,421	



Graf 2: V-A charakteristika vzorků SV při teplotě 100 °C

Tabulka 6: Hodnoty vzorků SV při teplotě 200 °C

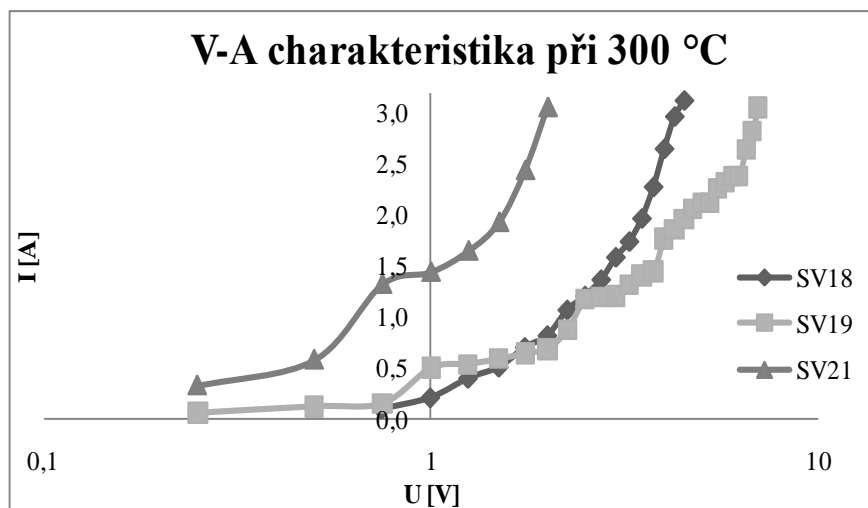
	200 °C					
	SV18		SV19		SV21	
U [V]	I [A]	R [Ω]	I [A]	R [Ω]	I [A]	R [Ω]
0,25	0,060	4,167	0,064	3,906	0,034	7,353
0,30	0,092	3,261	0,105	2,857	0,084	3,571
0,40	0,101	3,960	0,134	2,985	0,176	2,273
0,50	0,138	3,623	0,188	2,660	0,212	2,358
0,60	0,178	3,371	0,258	2,326	0,270	2,222
0,75	0,209	3,589	0,314	2,389	0,320	2,344
0,80	0,232	3,448	0,376	2,128	0,356	2,247
0,90	0,242	3,719	0,405	2,222	0,424	2,123
1,00	0,266	3,759	0,450	2,222	0,498	2,008
1,25	0,298	4,195	0,503	2,485	0,861	1,452
1,50	0,330	4,545	0,525	2,857	1,132	1,325
1,75	0,456	3,838	0,630	2,778	1,466	1,194
2,00	0,602	3,322	0,942	2,123	1,724	1,160
2,25	0,921	2,443	1,092	2,060	1,775	1,268
2,50	1,224	2,042	1,224	2,042	1,836	1,362
2,75	1,435	1,916	1,328	2,071	2,184	1,259
3,00	1,530	1,961	1,486	2,019	2,534	1,184
3,25	1,762	1,844	1,692	1,921	2,564	1,268
3,50	2,166	1,616	1,872	1,870	3,096	1,130
3,75	2,698	1,390	2,210	1,697		
4,00	2,734	1,463	2,316	1,727		
4,25	2,992	1,420	2,812	1,511		
4,50			3,090	1,456		
Průměrný odpor:	2,950		2,274		2,058	
Průměrná vodivost:	0,339		0,440		0,486	



Graf 3: V-A charakteristika vzorků SV při teplotě 200 °C

Tabulka 7: Hodnoty vzorků SV při teplotě 300 °C

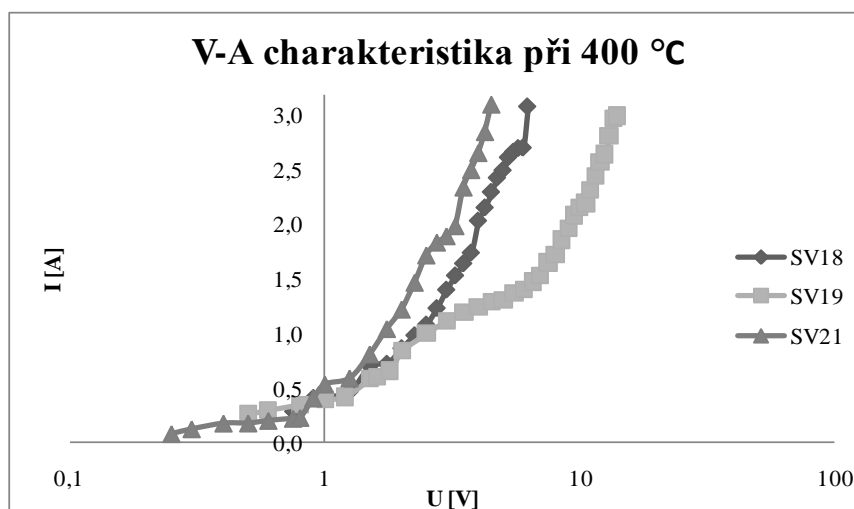
U [V]	300 °C					
	SV18		SV19		SV21	
	I [A]	R [Ω]	I [A]	R [Ω]	I [A]	R [Ω]
0,25			0,056	4,464	0,326	0,767
0,30			0,098	3,061	0,462	0,649
0,40			0,106	3,774	0,534	0,749
0,50			0,120	4,167	0,578	0,865
0,60			0,143	4,196	0,856	0,701
0,75	0,092	8,152	0,150	5,000	1,320	0,568
0,80	0,154	5,195	0,254	3,150	1,387	0,577
0,90	0,175	5,143	0,379	2,375	1,406	0,640
1,00	0,204	4,902	0,498	2,008	1,438	0,695
1,25	0,394	3,173	0,537	2,328	1,645	0,760
1,50	0,504	2,976	0,586	2,560	1,926	0,779
1,75	0,698	2,507	0,643	2,722	2,436	0,718
2,00	0,814	2,457	0,684	2,924	3,052	0,655
2,25	1,065	2,113	0,878	2,563		
2,50	1,202	2,080	1,174	2,129		
2,75	1,362	2,019	1,191	2,309		
3,00	1,582	1,896	1,204	2,492		
3,25	1,736	1,872	1,312	2,477		
3,50	1,962	1,784	1,404	2,493		
3,75	2,272	1,651	1,446	2,593		
4,00	2,646	1,512	1,766	2,265		
4,25	2,962	1,435	1,858	2,287		
4,50	3,119	1,443	1,964	2,291		
4,75			2,066	2,299		
5,00			2,122	2,356		
5,25			2,126	2,469		
5,50			2,254	2,440		
5,75			2,316	2,483		
6,00			2,382	2,519		
6,25			2,384	2,622		
6,50			2,642	2,460		
6,75			2,822	2,392		
7,00			3,056	2,291		
Průměrný odpor:	2,906		2,756		0,702	
Průměrná vodivost:	0,344		0,363		1,425	



Graf 4: V-A charakteristika vzorků SV při teplotě 300 °C

Tabulka 8: Hodnoty vzorků SV při teplotě 400 °C

	400 °C						
	SV18		SV21		SV19		
U [V]	I [A]	R [Ω]	I [A]	R [Ω]	U [V]	I [A]	R [Ω]
0,25			0,080	3,125	0,5	0,264	1,894
0,30			0,124	2,419	0,6	0,301	1,993
0,40			0,176	2,273	0,8	0,352	2,273
0,50			0,177	2,825	1,0	0,397	2,519
0,60			0,201	2,985	1,2	0,423	2,837
0,75	0,296	2,534	0,220	3,409	1,5	0,587	2,555
0,80	0,340	2,353	0,228	3,509	1,6	0,611	2,619
0,90	0,418	2,153	0,406	2,217	1,8	0,663	2,715
1,00	0,420	2,381	0,534	1,873	2,0	0,842	2,375
1,25	0,476	2,626	0,590	2,119	2,5	1,003	2,493
1,50	0,710	2,113	0,810	1,852	3,0	1,123	2,671
1,75	0,730	2,397	1,042	1,679	3,5	1,200	2,917
2,00	0,872	2,294	1,220	1,639	4,0	1,243	3,218
2,25	0,990	2,273	1,466	1,535	4,5	1,297	3,470
2,50	1,088	2,298	1,716	1,457	5,0	1,311	3,814
2,75	1,238	2,221	1,834	1,499	5,5	1,378	3,991
3,00	1,406	2,134	1,892	1,586	6,0	1,412	4,249
3,25	1,536	2,116	1,984	1,638	6,5	1,478	4,398
3,50	1,646	2,126	2,338	1,497	7,0	1,536	4,557
3,75	1,744	2,150	2,498	1,501	7,5	1,654	4,534
4,00	2,036	1,965	2,654	1,507	8,0	1,732	4,619
4,25	2,156	1,971	2,846	1,493	8,5	1,864	4,560
4,50	2,298	1,958	3,098	1,453	9,0	1,964	4,582
4,75	2,428	1,956			9,5	2,087	4,552
5,00	2,496	2,003			10,0	2,164	4,621
5,25	2,614	2,008			10,5	2,200	4,773
5,50	2,664	2,065			11,0	2,315	4,752
5,75	2,698	2,131			11,5	2,453	4,688
6,00	2,702	2,221			12,0	2,575	4,660
6,25	3,078	2,031			12,5	2,646	4,724
6,50					13,0	2,812	4,623
6,75					13,5	2,974	4,539
7,00					14,0	3,000	4,667
Průměrný odpor:			2,179			3,711	
Průměrná vodivost:		0,459			0,269		

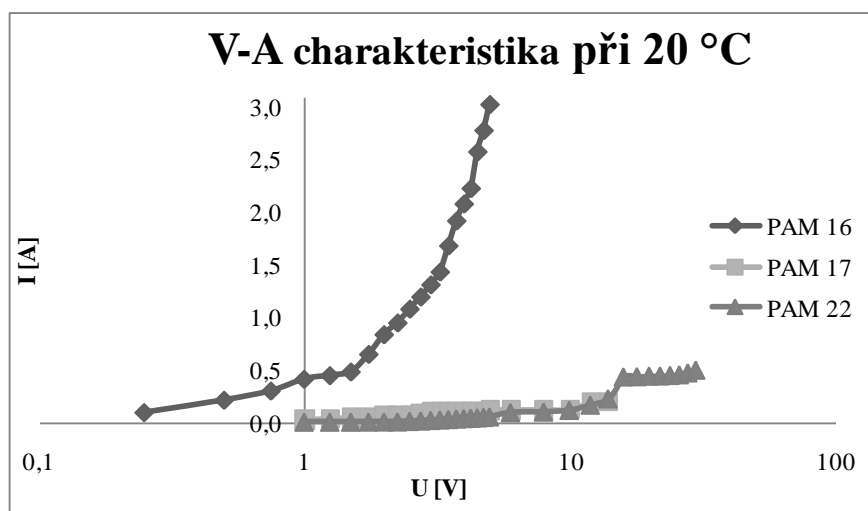


Graf 5: V-A charakteristika vzorků SV při teplotě 400 °C

Hodnoty vzorků PAM 16, PAM 17, PAM 22 a PMM 20 pro elektrickou vodivost

Tabulka 9: Hodnoty vzorků PAM při teplotě 20 °C

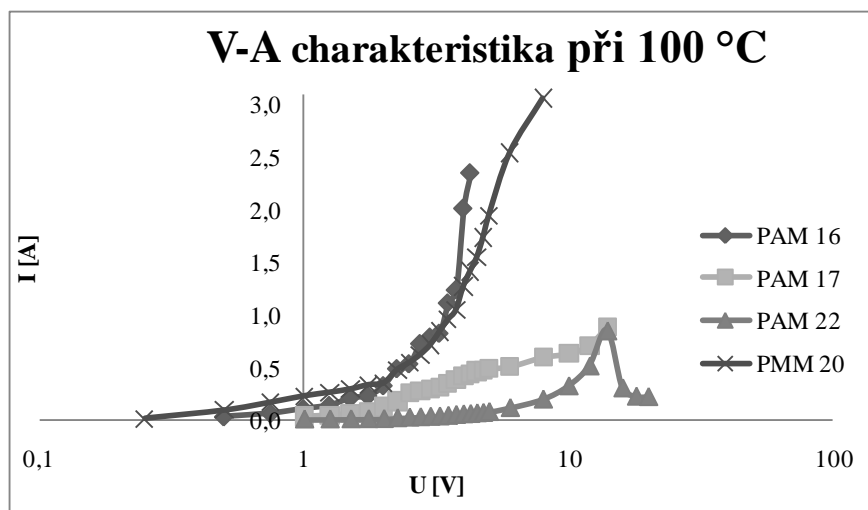
	20 °C					
	PAM 16		PAM 17		PAM 22	
U [V]	I [A]	R [Ω]	I [A]	R [Ω]	I [A]	R [Ω]
0,25	0,098	2,551				
0,50	0,216	2,315				
0,75	0,304	2,467				
1,00	0,416	2,404	0,028	35,714	0,006	166,667
1,25	0,451	2,772	0,036	34,722	0,006	208,333
1,50	0,486	3,086	0,048	31,250	0,006	250,000
1,75	0,654	2,676	0,060	29,167	0,007	250,000
2,00	0,842	2,375	0,070	28,571	0,008	250,000
2,25	0,954	2,358	0,074	30,405	0,008	281,250
2,50	1,086	2,302	0,080	31,250	0,013	192,308
2,75	1,202	2,288	0,096	28,646	0,017	161,765
3,00	1,318	2,276	0,110	27,273	0,022	136,364
3,25	1,440	2,257	0,110	29,545	0,027	120,370
3,50	1,690	2,071	0,112	31,250	0,031	112,903
3,75	1,928	1,945	0,112	33,482	0,036	104,167
4,00	2,090	1,914	0,114	35,088	0,040	100,000
4,25	2,238	1,899	0,114	37,281	0,043	98,837
4,50	2,588	1,739	0,114	39,474	0,047	95,745
4,75	2,792	1,701	0,114	41,667	0,051	93,137
5,00	3,040	1,645	0,120	41,667	0,056	89,286
6,00			0,122	49,180	0,096	62,500
8,00			0,122	65,574	0,102	78,431
10,00			0,124	80,645	0,118	84,746
12,00			0,198	60,606	0,168	71,429
14,00			0,202	69,307	0,228	61,404
16,00					0,436	36,697
18,00					0,438	41,096
20,00					0,444	45,045
22,00					0,445	49,438
24,00					0,450	53,333
26,00					0,456	57,018
28,00					0,474	59,072
30,00					0,500	60,000
Průměrný odpor:	2,252		40,535		115,711	
Průměrná vodivost:	0,444		0,025		0,009	



Graf 6: V-A charakteristika vzorků PAM při teplotě 20 °C

Tabulka 10: Hodnoty vzorků PAM a PMM při teplotě 100 °C

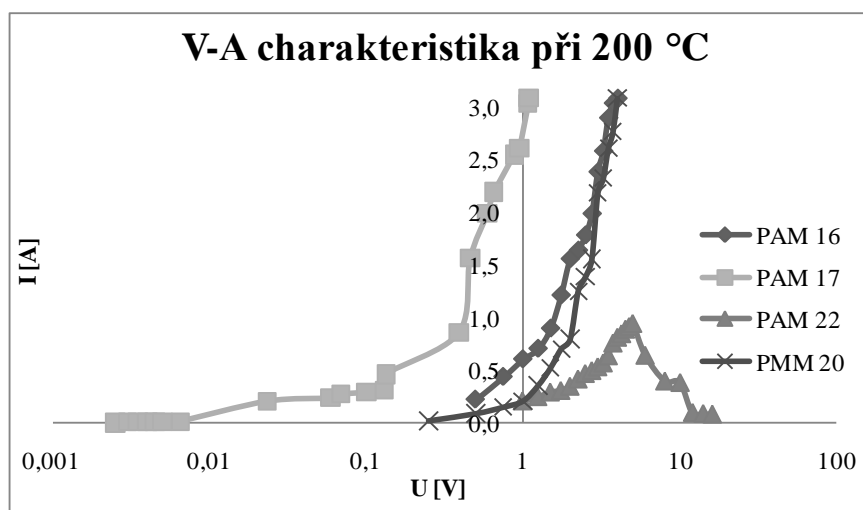
	100 °C							
	PAM 16		PAM 17		PAM 22		PMM 20	
U [V]	I [A]	R [Ω]	I [A]	R [Ω]	I [A]	R [Ω]	I [A]	R [Ω]
0,25							0,018	13,889
0,50	0,036	13,889					0,096	5,208
0,75	0,068	11,029					0,172	4,360
1,00	0,112	8,929	0,042	23,810	0,010	100,000	0,232	4,310
1,25	0,144	8,681	0,053	23,585	0,011	113,636	0,266	4,699
1,50	0,214	7,009	0,067	22,388	0,012	125,000	0,298	5,034
1,75	0,234	7,479	0,074	23,649	0,013	134,615	0,338	5,178
2,00	0,332	6,024	0,126	15,873	0,014	142,857	0,356	5,618
2,25	0,494	4,555	0,184	12,228	0,022	102,273	0,484	4,649
2,50	0,540	4,630	0,265	9,434	0,028	89,286	0,550	4,545
2,75	0,732	3,757	0,279	9,857	0,032	85,938	0,626	4,393
3,00	0,794	3,778	0,295	10,169	0,036	83,333	0,718	4,178
3,25	0,830	3,916	0,312	10,417	0,039	83,333	0,844	3,851
3,50	1,118	3,131	0,356	9,831	0,045	77,778	0,960	3,646
3,75	1,242	3,019	0,387	9,690	0,054	69,444	1,050	3,571
4,00	2,018	1,982	0,428	9,346	0,060	66,667	1,274	3,140
4,25	2,356	1,804	0,446	9,529	0,063	67,460	1,422	2,989
4,50			0,468	9,615	0,070	64,470	1,552	2,899
4,75			0,473	10,042	0,073	64,891	1,740	2,730
5,00			0,497	10,060	0,082	60,976	1,952	2,561
6,00			0,512	11,719	0,120	50,000	2,550	2,353
8,00			0,602	13,289	0,202	39,604	3,070	2,606
10,00			0,638	15,674	0,330	30,303		
12,00			0,714	16,807	0,522	22,989		
14,00			0,888	15,766	0,860	16,279		
16,00					0,310	51,613		
18,00					0,230	78,261		
20,00					0,226	88,496		
Průměrný odpor:	5,851		13,763		76,380		4,382	
Průměrná vodivost:	0,171		0,073		0,013		0,228	



Graf 7: V-A charakteristika vzorků PAM a PMM při teplotě 100 °C

Tabulka 11: Hodnoty vzorků PAM a PMM při teplotě 200 °C

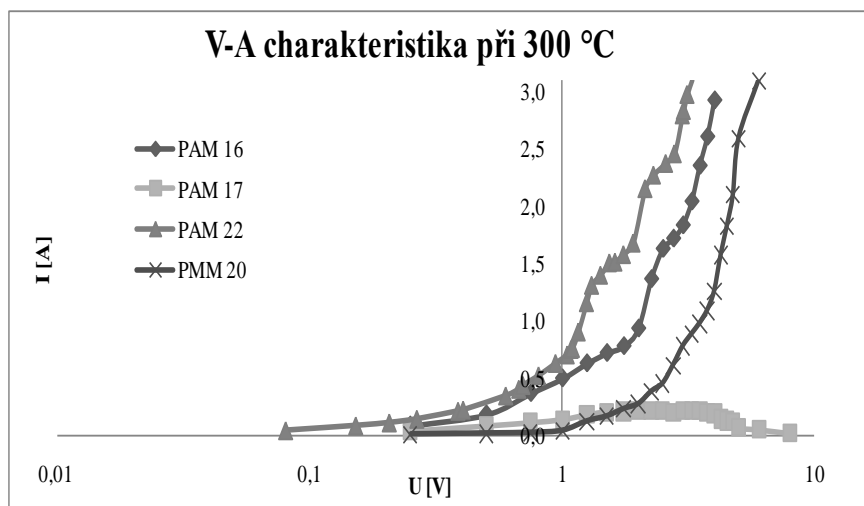
	200 °C								
	PAM 16		PAM 22		PMM 20		PAM 17		
U [V]	I [A]	R [Ω]	I [A]	R [Ω]	I [A]	R [Ω]	U [V]	I [A]	R [Ω]
0,25					0,024	10,417	0,003	0,004	0,625
0,50	0,224	2,232			0,092	5,435	0,003	0,010	0,300
0,75	0,440	1,705			0,154	4,870	0,004	0,010	0,350
1,00	0,608	1,645	0,212	4,717	0,212	4,717	0,004	0,011	0,364
1,25	0,708	1,766	0,253	4,941	0,360	3,472	0,005	0,012	0,375
1,50	0,900	1,667	0,297	5,051	0,528	2,841	0,005	0,014	0,357
1,75	1,216	1,439	0,312	5,609	0,708	2,472	0,007	0,018	0,361
2,00	1,562	1,280	0,352	5,682	0,800	2,500	0,023	0,208	0,113
2,25	1,643	1,369	0,421	5,344	1,258	1,789	0,059	0,238	0,248
2,50	1,788	1,398	0,474	5,274	1,392	1,796	0,069	0,274	0,251
2,75	1,992	1,381	0,502	5,478	1,562	1,761	0,100	0,293	0,341
3,00	2,390	1,255	0,538	5,576	2,186	1,372	0,130	0,316	0,410
3,25	2,588	1,256	0,575	5,652	2,328	1,396	0,134	0,466	0,287
3,50	2,904	1,205	0,643	5,443	2,614	1,339	0,389	0,860	0,453
3,75	3,044	1,232	0,765	4,902	2,774	1,352	0,460	1,566	0,294
4,00	3,090	1,294	0,820	4,878	3,094	1,293	0,590	1,992	0,296
4,25			0,854	4,977			0,655	2,200	0,298
4,50			0,897	5,017			0,877	2,554	0,344
4,75			0,923	5,146			0,949	2,622	0,362
5,00			0,952	5,252			1,080	3,038	0,355
6,00			0,648	9,259			1,082	3,094	0,350
8,00			0,402	19,900					
10,00			0,388	25,773					
12,00			0,102	117,647					
14,00			0,092	152,174					
16,00			0,086	186,047					
Průměrný odpor:	1,475		26,076		3,051			0,340	
Průměrná vodivost:	0,678		0,038		0,328			2,945	



Graf 8: V-A charakteristika vzorků PAM a PMM při teplotě 200 °C

Tabulka 12: Hodnoty vzorků PAM a PMM při teplotě 300 °C

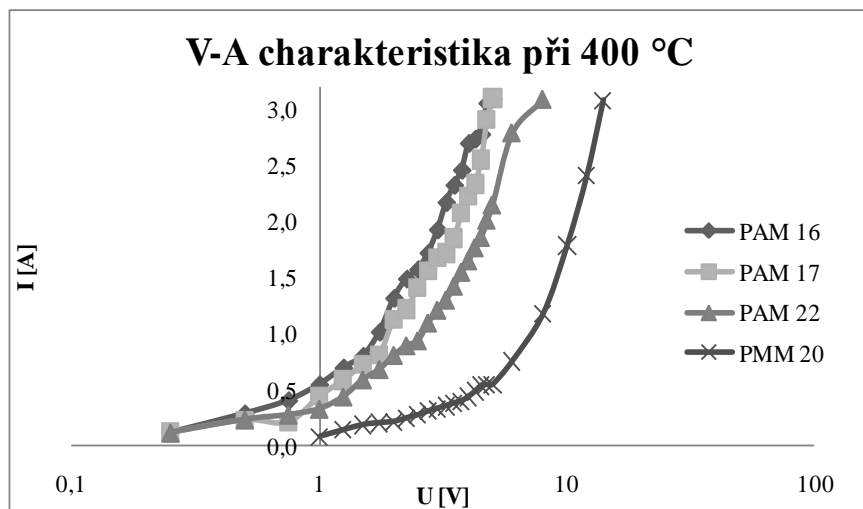
	300 °C									
	PAM16			PAM17		PMM20			PAM22	
U [V]	I [A]	R [Ω]		I [A]	R [Ω]	I [A]	R [Ω]		U [V]	I [A]
0,25	0,084	2,976	0,042	5,952	0,006	41,667	0,08	0,042	1,926	
0,50	0,182	2,747	0,086	5,814	0,014	35,714	0,15	0,084	1,823	
0,75	0,368	2,038	0,114	6,579	0,020	37,500	0,21	0,110	1,889	
1,00	0,496	2,016	0,140	7,143	0,038	26,316	0,27	0,142	1,880	
1,25	0,628	1,990	0,181	6,906	0,120	10,417	0,39	0,212	1,833	
1,50	0,718	2,089	0,206	7,282	0,164	9,146	0,41	0,222	1,833	
1,75	0,778	2,249	0,210	8,333	0,228	7,675	0,60	0,346	1,732	
2,00	0,932	2,146	0,220	9,091	0,272	7,353	0,68	0,404	1,672	
2,25	1,364	1,650	0,222	10,135	0,380	5,921	0,70	0,438	1,600	
2,50	1,628	1,536	0,222	11,261	0,452	5,531	0,81	0,522	1,548	
2,75	1,718	1,601	0,200	13,750	0,612	4,493	0,94	0,630	1,497	
3,00	1,834	1,636	0,219	13,699	0,776	3,866	1,05	0,704	1,491	
3,25	2,042	1,592	0,218	14,908	0,882	3,685	1,09	0,752	1,445	
3,50	2,354	1,487	0,212	16,509	0,976	3,586	1,10	0,760	1,447	
3,75	2,608	1,438	0,200	18,750	1,088	3,447	1,16	0,904	1,283	
4,00	2,926	1,367	0,192	20,833	1,256	3,185	1,25	1,160	1,078	
4,25			0,142	29,930	1,576	2,697	1,31	1,312	0,998	
4,50			0,130	34,615	1,830	2,459	1,42	1,400	1,014	
4,75			0,114	41,667	2,100	2,262	1,54	1,508	1,021	
5,00			0,067	74,627	2,594	1,928	1,62	1,514	1,070	
6,00			0,052	115,385	3,100	1,935	1,75	1,580	1,108	
8,00			0,020	400,000			1,91	1,680	1,137	
10,00							2,13	2,156	0,988	
12,00							2,30	2,274	1,011	
14,00							2,57	2,376	1,082	
16,00							2,78	2,460	1,130	
18,00							2,99	2,800	1,068	
20,00							3,02	2,838	1,064	
22,00					3,12	2,978	1,049			
24,00							3,26	3,104	1,050	
Průměrný odpor:	1,910			39,690		220,783			1,359	
Průměrná vodivost:	0,524			0,025		0,005			0,736	



Graf 9: V-A charakteristika vzorků PAM a PMM při teplotě 300 °C

Tabulka 13: Hodnoty vzorků PAM a PMM při teplotě 400 °C

	400 °C							
	PAM16		PAM17		PAM22		PMM20	
U [V]	I [A]	R [Ω]	I [A]	R [Ω]	I [A]	R [Ω]	I [A]	R [Ω]
0,25	0,118	2,119	0,122	2,049	0,114	2,193		
0,50	0,288	1,736	0,234	2,137	0,232	2,155		
0,75	0,406	1,847	0,214	3,505	0,274	2,737		
1,00	0,548	1,825	0,444	2,252	0,326	3,067	0,080	12,500
1,25	0,698	1,791	0,586	2,133	0,436	2,867	0,140	8,929
1,50	0,802	1,870	0,728	2,060	0,588	2,551	0,186	8,065
1,75	1,018	1,719	0,812	2,155	0,680	2,574	0,202	8,663
2,00	1,320	1,515	1,134	1,764	0,806	2,481	0,214	9,346
2,25	1,492	1,508	1,222	1,841	0,892	2,522	0,246	9,146
2,50	1,576	1,586	1,414	1,768	0,936	2,671	0,274	9,124
2,75	1,724	1,595	1,560	1,763	1,094	2,514	0,308	8,929
3,00	1,932	1,553	1,682	1,784	1,208	2,483	0,332	9,036
3,25	2,176	1,494	1,718	1,892	1,298	2,504	0,356	9,129
3,50	2,330	1,502	1,854	1,888	1,422	2,461	0,380	9,211
3,75	2,464	1,522	2,076	1,806	1,546	2,426	0,400	9,375
4,00	2,704	1,479	2,224	1,799	1,648	2,427	0,438	9,132
4,25	2,742	1,550	2,338	1,818	1,764	2,409	0,486	8,745
4,50	2,784	1,616	2,554	1,762	1,856	2,425	0,536	8,396
4,75	3,062	1,551	2,908	1,633	2,010	2,363	0,542	8,764
5,00	3,100	1,613	3,102	1,612	2,146	2,330	0,546	9,158
6,00					2,788	2,152	0,754	7,958
8,00					3,086	2,592	1,178	6,791
10,00							1,790	5,587
12,00							2,408	4,983
14,00							3,084	4,540
Průměrný odpor:	1,650		1,971		2,496		8,432	
Průměrná vodivost:	0,606		0,507		0,401		0,119	



Graf 10: V-A charakteristika vzorků PAM a PMM při teplotě 400 °C

3.3 Tepelná vodivost

3.3.1 Návrh obvodu a realizace zapojení

Při tomto měření bylo hlavním cílem relativní porovnání tepelné vodivosti jednotlivých vzorků (SV, PAM a PMM). Za tímto účelem byla vytvořena měřicí úloha blížící se 1D úloze vedení tepla tak, aby bylo možné určit, jak rychle se dokáže přenést teplo z jednoho konce vzorku na druhý.

Základ měřicí aparatury tvoří elektrická plotýnka (příloha A) zahřívající vzorek konstantní teplotou. Na střed elektrické plotýnky byl umístěn hliníkový kvádr o velikosti 40x40x130 mm pro přenos tepla mezi elektrickou plotýnkou a měřeným vzorkem, který měl zároveň funkci tepelného kondenzátoru. Aby teplot neunikalo konvekcí, byla kolem kvádrů a měřeného vzorku použita izolace. Fotografie navržené aparatury jsou uvedeny na obr. 6 a 7.

Na spodní a horní část měřeného vzorku se připevnila měřící čidla teploty (PT100). Hodnoty z těchto čidel byly automaticky zaznamenávány na 2 multimetry (příloha A).



Obrázek 6: Plotýnka s hliníkovým kvádrem a izolací



Obrázek 7: Aparatura pro měření tepelné vodivosti

3.3.2 Měření rychlosti zahřívání vzorku

Po sestavení obvodu bylo zahájeno měření. Nejprve byla zahřátá elektrická plotýnka na maximální teplotu 300 °C, tak aby byl vzorek zahříván konstantním výkonem. Poté se na její střed položil hliníkový kvádr, kolem kterého byla položena izolace. Na hliníkový kvádr je položen vzorek s čidly, který je také zabalen do izolace. Pomocí čidla připevněného na horním konci vzorku je měřeno teplo prošlé vzorkem. Měření bylo prováděno cca. 1 hodinu. Za tuto dobu bylo získáno dostatečné množství hodnot pro vypracování výsledků. Postupně byly tímto způsobem proměřeny všechny typy měřených vzorků (SV, PAM a PMM).

Zároveň s měřením hodnot změn teplot na konci vzorku, byl také měřen čas. Ten měřil dobu průchodu tepla vzorkem. Po změření také sloužil jako měřítko k určení, tepelné vodivosti jednotlivých vzorků.

3.3.3 Vyhodnocení měření rychlosti zahřívání vzorků

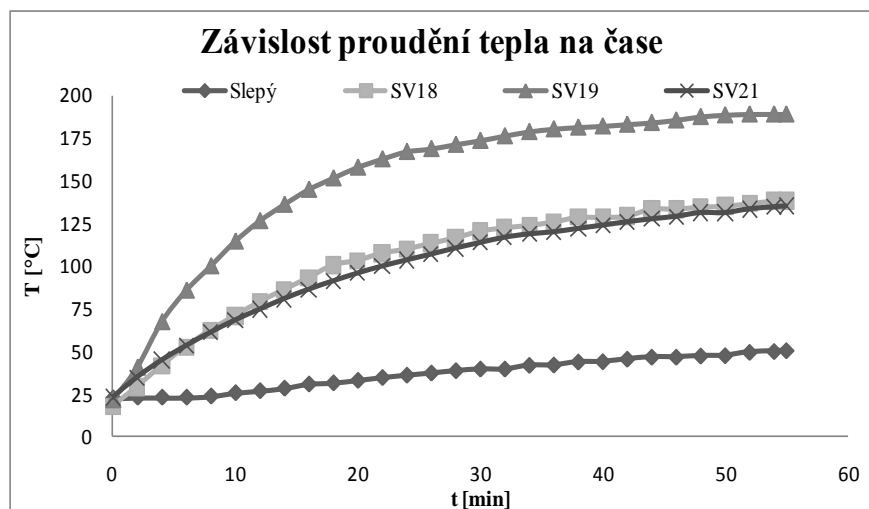
Z hodnot získaných během tohoto měření byly vypracovány tabulky a pro přehlednější zobrazení byly převedeny na grafy. Vše je zobrazené na následujících stránkách. Vzorky byly rozděleny na dvě skupiny. Jedna obsahovala typ SV a druhá skupina zase obsahovala typ PAM a PMM.

Všechny měřené vzorky jsou porovnávány se vzorovým (tzv. slepým) vzorkem bez příměsí zlepšujících jeho tepelnou vodivost. Tento vzorek má velmi malou elektrickou vodivost a jeho tepelná vodivost je také velmi nízká. V porovnání s tímto vzorkem lze určit, o kolik je lepší tepelná vodivost námi měřených vzorků.

Z měření vyplývá, že vzorky typu PAM mají na začátku měření velice prudký nárůst teploty do cca. 130 °C a poté se začíná jejich teplota pomalu stabilizovat. Je tak patrné, že mohou velice rychle přenášet teplo, čímž je jejich tepelná vodivost velice vysoká. Naopak vzorky typu SV mají na začátku měření pomalejší náběh a tím je způsobeno pomalejší prohřátí celého vzorku. Rozdílné náběhy přenosu tepla jsou ovlivněny strukturou každého vzorku. Z měření je patrné, že vzorky při jejichž přípravě bylo použito větší množství destilované vody, mají větší tepelnou vodivost (rychleji dokážou přenést teplo z jednoho konce na druhý), než vzorky bez destilované vody.

Tabulka 14: Porovnání hodnot vzorků typu SV se slepým vzorkem při určení tepelné vodivosti

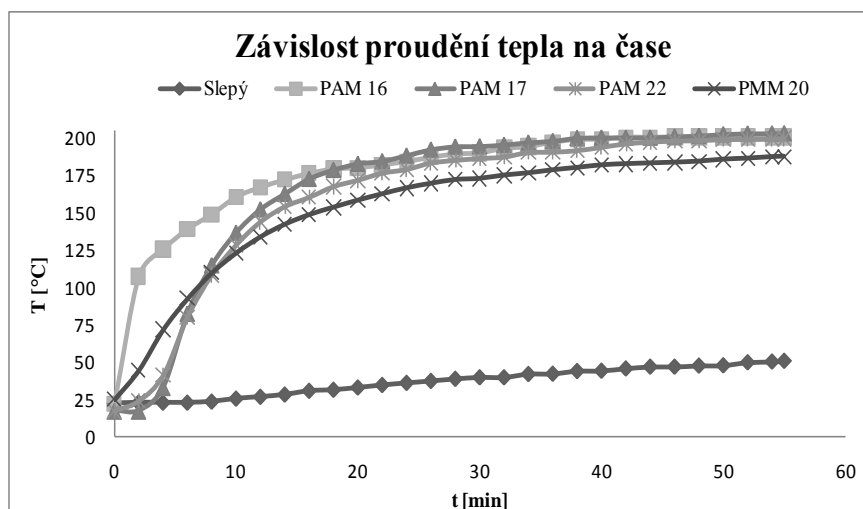
čas [min]	Slepý		SV18		SV19		SV21	
	Dolní čidlo	Horní čidlo	Dolní čidlo	Horní čidlo	Dolní čidlo	Horní čidlo	Dolní čidlo	Horní čidlo
0	268,0	22,0	291,0	17,3	284,7	21,0	282,8	22,7
2	269,4	22,5	278,4	28,6	286,0	40,1	267,5	34,5
4	274,8	22,5	275,8	41,1	285,5	66,8	265,5	44,5
6	276,5	22,5	274,1	52,3	283,3	85,3	266,0	53,0
8	278,0	23,2	277,5	62,0	280,1	99,6	270,9	60,8
10	278,0	25,2	280,4	70,4	276,5	114,1	274,1	68,0
12	276,7	26,4	280,4	78,6	276,7	126,1	275,3	74,3
14	273,6	27,9	279,7	85,8	280,9	135,7	274,5	80,5
16	275,0	30,4	277,7	92,8	283,3	144,5	273,1	86,0
18	279,7	31,1	275,0	100,3	283,5	151,2	270,4	90,9
20	282,3	32,6	274,1	103,0	282,3	157,5	271,6	95,5
22	283,0	34,3	278,4	107,3	279,9	162,4	276,3	99,6
24	282,3	35,7	281,6	109,7	277,0	166,7	278,7	103,2
26	280,4	37,0	282,3	113,1	279,2	168,4	279,4	106,6
28	278,2	38,4	281,6	116,3	283,5	170,9	278,2	110,2
30	280,6	39,4	279,7	120,2	285,2	173,2	276,3	113,4
32	284,7	39,4	277,0	122,2	285,2	175,9	273,8	116,5
34	286,9	41,6	276,5	123,6	283,8	178,4	276,5	118,5
36	287,2	41,8	280,9	125,6	281,4	180,0	281,6	119,7
38	286,2	43,6	283,5	128,3	279,2	181,0	284,3	121,7
40	284,0	43,8	284,3	128,3	282,3	181,7	285,0	123,6
42	281,8	45,3	283,3	129,0	286,2	182,7	284,0	125,6
44	284,7	46,5	281,4	133,2	287,6	183,7	282,1	127,3
46	288,6	46,5	278,7	133,2	286,9	185,2	279,2	128,8
48	290,3	47,2	278,7	134,4	285,2	187,2	278,9	131,0
50	290,3	47,4	282,8	134,9	282,3	188,2	283,5	131,0
52	288,9	49,4	285,5	136,4	280,9	188,7	285,7	133,2
54	286,4	49,9	286,2	137,9	285,0	188,7	286,4	134,4
55	285,2	50,4	285,7	137,9	286,7	188,7	286,0	134,9



Graf 11: Závislost proudění tepla na čase u vzorků typu SV

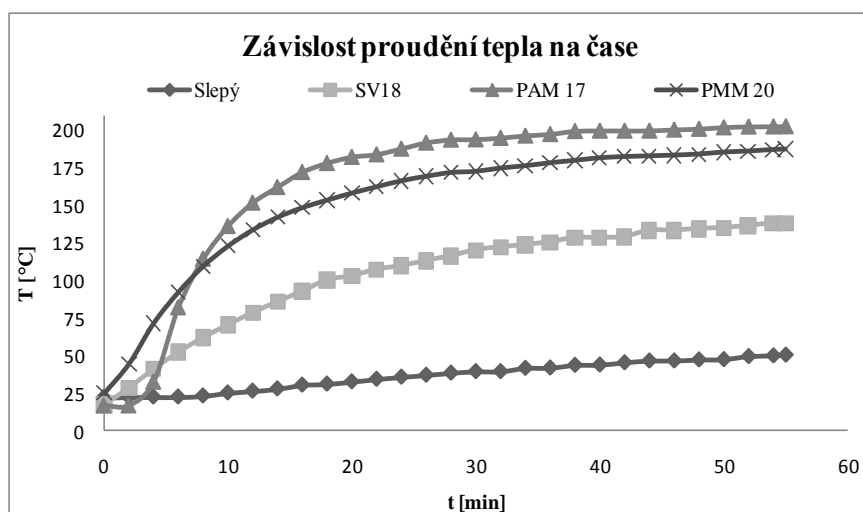
Tabulka 15: Porovnání hodnot vzorků typu PAM a PMM se slepým vzorkem při určení tepelné vodivosti

čas [min]	Slepý		PAM 16		PAM 17		PAM 22		PMM 20	
	Dolní čidlo	Horní čidlo	Dolní čidlo	Horní čidlo	Dolní čidlo	Horní čidlo	Dolní čidlo	Horní čidlo	Dolní čidlo	Horní čidlo
0	268,0	22,0	230,2	22,0	250,6	16,8	248,9	17,0	192,7	24,9
2	269,4	22,5	238,5	107,1	252,1	16,8	228,9	23,7	202,2	44,5
4	274,8	22,5	240,3	125,3	259,9	32,6	203,2	40,9	207,2	71,6
6	276,5	22,5	241,7	138,8	256,7	82,2	234,6	80,0	209,0	92,3
8	278,0	23,2	246,2	148,8	255,5	114,6	239,0	108,3	213,0	109,5
10	278,0	25,2	252,1	160,4	260,4	136,4	241,3	128,3	216,2	122,9
12	276,7	26,4	254,0	166,9	261,6	152,0	241,7	143,8	218,5	133,7
14	273,6	27,9	254,8	171,9	261,6	162,4	242,0	154,0	219,5	142,1
16	275,0	30,4	254,3	176,2	249,4	172,4	246,2	160,2	221,2	148,5
18	279,7	31,1	252,8	179,2	246,9	178,4	250,4	167,4	225,2	153,5
20	282,3	32,6	252,8	180,0	248,9	182,5	252,8	171,7	228,9	158,2
22	283,0	34,3	256,0	182,0	253,3	184,2	253,3	176,4	230,9	162,4
24	282,3	35,7	259,2	184,2	254,8	188,0	252,8	178,9	232,1	166,4
26	280,4	37,0	261,1	187,0	254,5	192,0	251,6	183,2	232,1	169,4
28	278,2	38,4	261,9	189,2	252,3	194,0	250,9	185,0	231,9	171,9
30	280,6	39,4	261,9	190,0	249,9	194,2	254,5	186,2	232,4	172,7
32	284,7	39,4	259,4	193,0	253,6	195,2	257,5	187,2	235,3	174,9
34	286,9	41,6	263,1	194,2	257,0	196,7	258,7	190,2	237,8	176,4
36	287,2	41,8	266,3	197,2	257,5	197,7	258,7	190,5	238,8	178,4
38	286,2	43,6	264,8	199,0	255,8	199,7	257,5	191,5	238,8	180,0
40	284,0	43,8	264,6	199,2	254,0	200,0	255,5	193,7	238,3	181,7
42	281,8	45,3	270,2	200,5	252,8	200,0	255,3	196,0	237,1	182,5
44	284,7	46,5	270,2	200,5	257,2	200,0	258,9	197,2	237,8	183,0
46	288,6	46,5	270,2	200,7	259,4	200,7	261,4	197,9	240,5	183,5
48	290,3	47,2	270,2	200,7	259,9	201,2	262,1	198,2	242,5	184,2
50	290,3	47,4	270,4	200,7	258,2	202,2	261,4	198,9	243,2	185,5
52	288,9	49,4	270,4	200,7	255,3	202,7	259,9	199,0	243,7	186,2
54	286,4	49,9	270,7	200,7	255,5	202,8	257,7	199,2	242,5	187,2
55	285,2	50,4	270,7	200,7	258,0	202,9	257,2	199,7	241,5	187,5



Tabulka 16: Porovnání hodnot vybraných vzorků typu SV, PAM a PMM se slepým vzorkem při určení tepelné vodivosti

čas [min]	Slepý		SV18		PAM17		PMM20	
	Dolní čidlo	Horní čidlo	Dolní čidlo	Horní čidlo	Dolní čidlo	Horní čidlo	Dolní čidlo	Horní čidlo
0	268,0	22,0	291,0	17,3	250,6	16,8	192,7	24,9
2	269,4	22,5	278,4	28,6	252,1	16,8	202,2	44,5
4	274,8	22,5	275,8	41,1	259,9	32,6	207,2	71,6
6	276,5	22,5	274,1	52,3	256,7	82,2	209,0	92,3
8	278,0	23,2	277,5	62,0	255,5	114,6	213,0	109,5
10	278,0	25,2	280,4	70,4	260,4	136,4	216,2	122,9
12	276,7	26,4	280,4	78,6	261,6	152,0	218,5	133,7
14	273,6	27,9	279,7	85,8	261,6	162,4	219,5	142,1
16	275,0	30,4	277,7	92,8	249,4	172,4	221,2	148,5
18	279,7	31,1	275,0	100,3	246,9	178,4	225,2	153,5
20	282,3	32,6	274,1	103,0	248,9	182,5	228,9	158,2
22	283,0	34,3	278,4	107,3	253,3	184,2	230,9	162,4
24	282,3	35,7	281,6	109,7	254,8	188,0	232,1	166,4
26	280,4	37,0	282,3	113,1	254,5	192,0	232,1	169,4
28	278,2	38,4	281,6	116,3	252,3	194,0	231,9	171,9
30	280,6	39,4	279,7	120,2	249,9	194,2	232,4	172,7
32	284,7	39,4	277,0	122,2	253,6	195,2	235,3	174,9
34	286,9	41,6	276,5	123,6	257,0	196,7	237,8	176,4
36	287,2	41,8	280,9	125,6	257,5	197,7	238,8	178,4
38	286,2	43,6	283,5	128,3	255,8	199,7	238,8	180,0
40	284,0	43,8	284,3	128,3	254,0	200,0	238,3	181,7
42	281,8	45,3	283,3	129,0	252,8	200,0	237,1	182,5
44	284,7	46,5	281,4	133,2	257,2	200,0	237,8	183,0
46	288,6	46,5	278,7	133,2	259,4	200,7	240,5	183,5
48	290,3	47,2	278,7	134,4	259,9	201,2	242,5	184,2
50	290,3	47,4	282,8	134,9	258,2	202,2	243,2	185,5
52	288,9	49,4	285,5	136,4	255,3	202,7	243,7	186,2
54	286,4	49,9	286,2	137,9	255,5	202,8	242,5	187,2
55	285,2	50,4	285,7	137,9	258,0	202,9	241,5	187,5



Graf 13: Závislost proudění tepla na čase u vzorků typu SV 18, PAM 17 a PMM 20

4 Závěr

Během bakalářské práce bylo provedeno experimentální měření 2 typů geopolymerních vzorků (SV – s obsahem destilované vody cca. 0–50 ml a PAM – s vyšším obsahem destilované vody cca. 200–250 ml). Jednotlivé vzorky byly složeny z různého množství směsí (viz. Kapitola 3.1), a tak každý vykazoval specifické vlastnosti. Pro lepší manipulaci a možnosti měření byly vzorky vyrobeny do tvaru malého kvádrů s elektrody na koncích pro lepší uchycení k měřicí aparatuře. Byly navrženy a sestaveny dvě měřicí aparatury za účelem měření elektrické a tepelné vodivosti měřených vzorků. Návrhy a realizace těchto aparatur byly sestaveny po prostudování dostupných materiálů z internetu a různých technických časopisů a knih.

Na začátku celé práce je vypracovaná rešerše k danému tématu. Tato část práce obsahuje důležité informace, potřebné k pochopení základních znalostí, týkající se geopolymerů. Vysvětluje jejich strukturu, složení, výrobu a použití. Dále se zaměřuje na možnosti, jak proměřovat jejich vlastnosti (elektrickou a tepelnou vodivost). Jsou v ní rozepsány a vysvětleny postupy jednotlivých měření pro dané vlastnosti. U každého typu měření jsou uvedeny vzorce pro měření. Z takto získaných a prostudovaných metod měření různých vlastností byly připraveny aparatury pro měření geopolymerních vzorků. Experimentální část je rozdělena na dvě části.

První část je věnována měření elektrické vodivosti vzorků, druhá část pak měření tepelné vodivosti. Při měření elektrické vodivosti byly měřeny V-A charakteristiky vzorků pro různé teploty (20, 100, 200, 300 a 400 °C). Tyto hodnoty byly poté zapsány do tabulek a pro přehlednost z nich byly vytvořeny grafy znázorňující jednotlivé V-A charakteristiky pro dané typy vzorků. Z hodnot z tabulek byl spočítán odpor pro jednotlivá napětí a následně byly určeny průměrné odpory pro jednotlivé typy vzorků.

Při tomto měření bylo zjištěno, že odpory jednotlivých vzorků dosahují řádově jednotek ohmů. To je velmi dobré, jelikož při prvních laboratorních měření dosahoval průměrný odpor vzorků řádově MΩ. Z těchto hodnot odporů byla poté spočítána elektrická vodivost jednotlivých vzorků. Nejlepší elektrickou vodivost vykazovaly vzorky typu SV. Jejich elektrická vodivost byla téměř konstantní při všech změnách teploty okolí. Hodnota elektrické vodivosti byla na úrovni cca. 0,44 (S). Hlavním důvodem těchto hodnot bylo také to, že vzorky tohoto typu neobsahovaly oproti vzorkům typu PAM téměř žádnou destilovanou vodu. Proto zde byly téměř vždy konstantní podmínky. Naproti tomu hodnoty vzorků PAM se s rostoucí teplotou měnily, což bylo způsobeno především zvýšeným obsahem destilované vody v jejich struktuře. Jak teplota okolí stoupala, začala se postupně vypařovat destilovaná voda a ve vzorcích vznikaly nejen náhlé a nečekané vnitřní změny, ale na povrchu těchto vzorků se začaly tvořit bublinky způsobené vypařováním destilované vody. Což byl hlavní důvod měnící se elektrické vodivosti.

Druhá část měření se zabývala zkoumáním tepelných vlastností jednotlivých vzorků. Při tomto měření bylo podstatné zjistit, jak dobře dokážou jednotlivé typy vzorků přenášet teplo z jednoho konce na druhý. Měření bylo navrženo jako 1D úloha vedení tepla s konstantní teplotou na jednom konci vzorku a následným měřením vývoje teploty na druhém konci. Pro přesnější určení přenosu tepla byl použit hliníkový kvádr položený na zahřáté plotýnce, který sloužil jako teplotní kondenzátor. Ten byl izolován z důvodu zamezení ztrát tepla konvencí do okolí. Na tento kvádr se postupně pokládaly všechny měřené vzorky a pomocí čidel byl měřen vývoj teploty na konci měřeného vzorku.

Při tomto porovnání bylo patrné, že vzorky typu PAM dosahují na začátku měření prudkého nárustu teploty (cca. 130 °C) a postupně se jejich teplota stabilizuje, až na 200 °C. Znamená to, že jejich tepelná vodivost je velice dobrá (dokážou velice rychle přenášet teplo z jednoho konce na druhý). Naproti tomu vzorky typu SV mají pozvolný nárůst teploty a proto jejich tepelná vodivost nebude tak velká jako u předchozího typu. Zároveň se u nich stabilizuje teplota na mnohem menší hodnotě, než u vzorků PAM. Hodnota jejich ustálené teploty dosahovala 140 °C.

Výsledky předkládané práce prokázaly, že provedené změny ve složení geopolymerů výrazně zlepšují jejich elektrickou a tepelnou vodivost, přičemž lze předpokládat, že dalším výzkumem budou tyto vlastnosti dále vylepšeny.

Seznam použité literatury

- [1] *www.matrix-2012.cz* [online]. 2008 [cit. 2010-11-24]. Geopolymery.
URL: <http://www.matrix-2012.cz/index.php?option=com_content&view=article&id=1149:geopolymery&catid=64:rzne&Itemid=88>.
- [2] *www.geopolymers.eu : Podstata hmoty* [online]. 2008 [cit. 2010-11-24]. Clay Polymer. URL: <<http://www.geopolymers.eu/cz/clay-polymer/podstata-hmoty.html>>
- [3] Elektrick%C3%A1 vodivost. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 26.07.2004, last modified on 08.10.2010 [cit. 2010-11-24]. URL: www:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektrick%C3%A1_vodivost>.
- [4] Tepeln%C3%A1 vodivost. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 27.09.2005, last modified on 29.10.2010 [cit. 2010-11-24]. URL: www: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Tepeln%C3%A1_vodivost>.
- [5] Thermal conductivity measurement. In *Wikipedia : the free encyclopedia* [online]. St. Petersburg (Florida) : Wikipedia Foundation, 23.04.2008, last modified on 10.10.2010 [cit. 2011-01-17]. Dostupné z WWW:
<http://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_conductivity_measurement>.
- [6] Bc.KŘENKOVÁ, Petra . *Měření tepelné vodivosti polymerních materiálů*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2008. 90 s. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, fakulta technologická

Příloha A: Přístroje pro měření



4x LCD obrazovka

Napájení 230/240 V

Vstup / Výstup: 2 x 0-30 V / 0-3 A

Rozměr: 128 x 255 x 335 mm

Hmotnost: 9 kg

Obrázek A.1: Zdroj napětí (DF-1731SB3A)



- Nerezové provedení
- Chladicí ventilátor
- Rovnoměrné rozložení teploty v peci
- Rychlý náběh na požadovanou teplotu

Vnější rozměr: 485 x 540 x 720 mm

Vnitřní rozměr: 170 x 170 x 275 mm

Hmotnost: 55 kg

Maximální teplota: 1200 °C

Objem: 7 l

Napájení: 230 V

Výkon: 3 W

Obrázek A.2: Laboratorní pec (LMH07/12)



Paměť pro 10 000 naměřených hodnot
 Propojení s počítačem pomocí kabelu
 Standardní oblast měření :
 ~ ss proud a napětí; kapacita; frekvence;
 teplota, odpor + Max a Min hodnota
 Podsvětlení; Ukazatel 40 000/4 000 dig.
 Rozměry: 92 x 205 x 40 mm

Obrázek A.3: Multimetr s automatickým záznamem dat (Voltcraft VC 960)



Obrázek A.4: Upevňovač vzorků



Příkon 1500 W
 Litinová plotna
 Rozměr plotny 180 mm

Obrázek A.5: Rohnson R-220 elektrický vařič
 jednoplátýnkový

Příloha B: Obvody měření



Obrázek B.1: Obvod měření elektrické vodivosti



Obrázek B.2: Aparatura pro měření tepelné vodivosti

Příloha C: Vzorky po měření



Obrázek C.1: Slepý vzorek



Obrázek C.2: Vzorek PMM 20



Obrázek C.3: Vzorek PAM 16



Obrázek C.4: Vzorek PAM 17



Obrázek C.5: Vzorek PAM 22



Obrázek C.6: Vzorek SV 18



Obrázek C.7: Vzorek SV 19